

Krzysztof FILIPOWICZ, Aleksander KOWAL  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK SPRĘŻYSTYCH METALOWEGO SPRZĘGŁA PODATNEGO SKRĘTNIE DO MASZYN GÓRNICZYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono budowę nowego rozwiązania konstrukcyjnego metalowego sprzęgła o dużej podatności skrętnej do zastosowania w maszynach górniczych oraz opis stanowisk badawczych i metodykę wyznaczania jego sprężystych charakterystyk statycznych i dynamicznych. Zaprezentowano także uzyskane wstępne wyniki badań, pozwalające na wyznaczenie wymienionych charakterystyk.

## DETERMINING ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE METAL FLEXIBLE TORSIONAL COUPLING TO MINING MACHINES

**Summary.** At work was described construction of new solving the structural metal coupling about the great torsion susceptibility, for applying in mining machines and description of research stands and methodology of determining its resilient static and dynamic characteristics. Also get preliminary research findings, allowing for appointing were presented exchanged for characteristics.

### 1. Wstęp

Jednym z warunków poprawnej pracy układów napędowych maszyn górniczych jest stosowanie w układach napędowych sprzęgieł o dużej podatności skrętnej, odpornych na oddziaływanie obciążeń dynamicznych. Odpowiednią podatność skrętną sprzęgła może zapewnić rozwiązanie opracowane w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Różne postaci konstrukcyjne metalowego sprzęgła podatnego skrętnie opisane zostały w pracach [3,4,5,6].

Sprzęgło podatne charakteryzuje się zarówno określonymi cechami sprężystymi, jak i tłumiącymi, które mają podstawowy wpływ na pracę układu napędowego przez zmianę przebiegu oraz stabilizację drgań skrętnych i momentu obciążającego. Przy zastosowaniu sprzęgieł podatnych o nieodpowiednich charakterystykach można doprowadzić do stanu niepoprawnej pracy całego układu napędowego. Koniecznością staje się wyznaczenie charakterystyk statycznych oraz dynamicznych sprzęgieł podatnych.

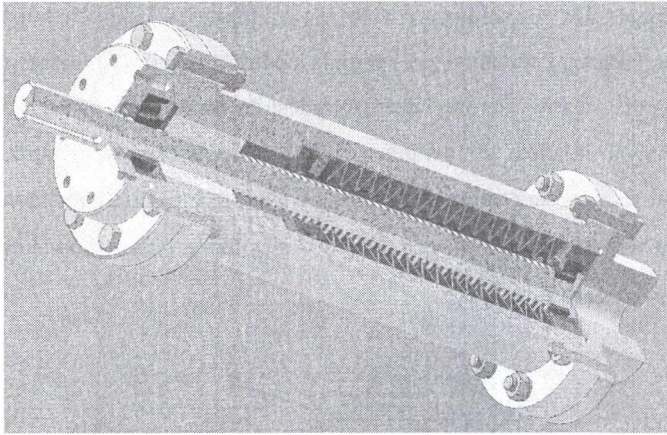
Analiza konstrukcyjna sprzęgieł podatnych, których większość posiada złożoną konstrukcję oraz zawiera łączniki podatne o trudno definiowalnych cechach fizykochemicznych, prowadzi do wniosku, że najbardziej odpowiednim i korzystnym sposobem wyznaczenia charakterystyk sprzęgieł podatnych jest przeprowadzenie badań doświadczalnych na odpowiednich stanowiskach badawczych.

## 2. Obiekt badań doświadczalnych

Charakterystyki wyznaczono dla jednej z postaci konstrukcyjnych nowego, metalowego sprzęgła podatnego skrętnie z jednym mechanizmem śrubowym (rys. 1). Istota jego działania polega na tym, że moment obrotowy przenoszony jest od strony czynnej do biernej za pomocą elementu przesuwnego z wykonanym mechanizmem gwintowym oraz połączeniem wielowypustowym.

Względny obrót członów sprzęgła, pod wpływem nominalnego obciążenia między wejściem i wyjściem, może być bardzo duży i wynosić np. pełny obrót wału wejściowego (czynnego), zanim wał wyjściowy (bierny) rozpocznie ruch obrotowy. Konstrukcję sprzęgła metalowego podatnego skrętnie szczegółowo opisano we wcześniejszych pracach oraz w patencie [3, 4, 6].

Badania przeprowadzono na prototypie sprzęgła z trzema różnymi zestawami sprężyn talerzowych. Doboru tych zestawów dokonano na drodze wcześniejszej analizy charakterystyk sprężyn talerzowych ułożonych w różne pakiety, tworzących zestawy. Zestawy były tak dobrane, aby przy założonym maksymalnym momencie skręcającym, wynoszącym  $M_{max} = 100 \text{ Nm}$ , sprężyny pracowały poniżej dopuszczalnego zakresu pracy, tzn. 75% ugięcia maksymalnego.



Rys. 1. Widok prototypu jednokierunkowego metalowego sprzęgła podatnego skrętnie  
 Fig. 1. View of the one-way prototype of the metal flexible torsional coupling

### 3. Wyznaczanie charakterystyki statycznej sprzęgła

Charakterystyka statyczna sprzęgła podatnego stanowi zależność momentu obrotowego  $M_{obr}$ , powodującego względny obrót członu czynnego i biernego sprzęgła o określony kąt obrotu  $\varphi$ . Zmiany momentu obrotowego w tym przypadku powinny przebiegać bardzo wolno.

$$M_{obr} = f(\varphi) \quad (1)$$

gdzie:

$M_{obr}$  – moment obrotowy obciążający sprzęgło podatne, Nm,

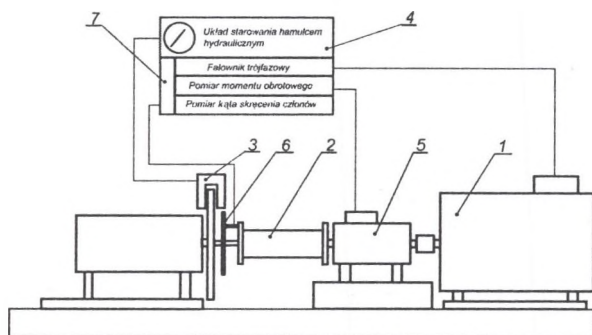
$\varphi$  – względny kąt skręcenia członów sprzęgła, radiany lub stopnie.

Kształt charakterystyk statycznych zależy od konstrukcji sprzęgła, materiału użytego na łącznik podatny, tj. układ sprężysto-tłumiący, oraz od samego ukształtowania łącznika. W przypadku najczęściej stosowanych w napędach maszyn roboczych sprzęgła z elementami podatnymi gumowymi lub z elastomerów charakterystyka jest nieliniowa z tłumieniem, co utrudnia poprawny dobór sprzęgła do układu napędowego [1, 7, 10].

Do wyznaczania charakterystyki statycznej sprzęgła wykorzystano stanowisko badawcze przeznaczone do badania sprzęgła mechanicznych w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, przedstawione na rysunku 2.

Silnik elektryczny (1) jest zasilany przez falownik stanowiący przetwornicę częstotliwości, która pozwala na płynną regulację prędkości obrotowej od 0 do 1700  $\text{min}^{-1}$ . Z wałem silnika połączony jest momentomierz tensometryczny (5), służący do pomiaru momentu obrotowego  $M_{obr} = M_{stat}$ . Wartość zmierzonego momentu obrotowego odczytywana i rejestrowana jest za pomocą komputerowej aparatury pomiarowej (7) typu SCXI firmy

National Instruments. Do wyjściowego wału momentomierza bezpośrednio połączony jest jeden z członów badanego metalowego sprzęgła podatnego (2), stanowiący jego obudowę. Drugi człon sprzęgła – wał wyjściowy, dołączony jest do tarczowego hamulca hydraulicznego (3) z hydraulicznym układem sterowania (4). Do wału wyjściowego sprzęgła, będącego członem biernym sprzęgła, przymocowano obrotową tarczę z podziałką kątową  $0^\circ \div 360^\circ$  (6). Do odczytu kąta względnego obrotu członów  $\varphi = \varphi_{stat}$  użyto przymocowanego do obudowy sprzęgła wskaźnika mechanicznego.



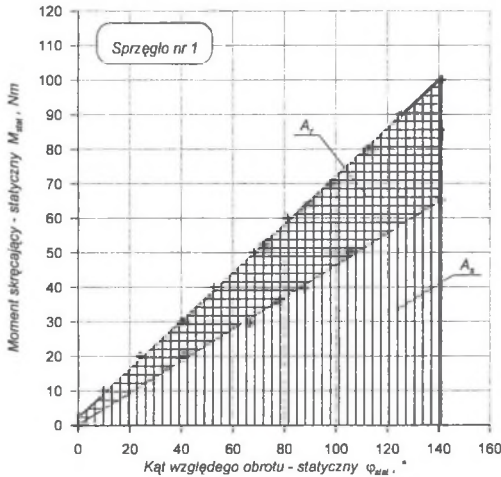
Rys. 2. Stanowisko do badania sprzęgieł mechanicznych, gdzie: 1 – silnik elektryczny, 2 – badane sprzęgło podatne, 3 – tarczowy hamulec hydrauliczny, 4 – układ sterowania hamulcem hydraulicznym, 5 – momentomierz tensometryczny, 6 – tarcza z podziałką kątową, 7 – aparatura pomiarowo-rejestrująca

Fig. 2. The testing stand used to test the mechanical couplings, where: 1 – electric motor, 2 – tested flexible coupling, 3 – hydraulic disc brake, 4 – control system of hydraulic brake, 5 – torque meter, 6 – disc with an angular scale, 7 – measuring-recording set

Po zamocowaniu sprzęgła na stanowisku badawczym za pomocą całkowicie zahamowanego hamulca hydraulicznego zablokowana zostaje możliwość obrotu jednego członu sprzęgła podatnego. Przez falownik następuje sterowanie silnika elektrycznego i stopniowo zwiększany jest statyczny moment obrotowy  $M_{stat}$ . Stopniowanie momentu skręcającego  $M_{stat}$  ustalono z krokiem 10 Nm do wartości maksymalnej  $M_{max} = 100$  Nm. Dla każdej wartości momentu dokonywano odczytu kąta względnego obrotu członów sprzęgła  $\varphi_{stat}$  na podziałce kątovej tarczy za pomocą wskaźnika, przymocowanego do ruchomej obudowy, stanowiącej drugi człon sprzęgła podatnego. Dokładność dokonywanego odczytu wynosiła  $\pm 1^\circ$ . Odczytów zależności momentu obrotowego  $M_{stat}$  od kąta względnego obrotu  $\varphi_{sta}$  dokonywano zarówno przy obciążaniu, jak i przy odciążaniu sprzęgła. Celem tak przyjętej procedury było określenie pętli histerezy, przedstawiającej przebieg tłumienia energii mechanicznej w układzie.

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie podstawowych sprężystych charakterystyk statycznych trzech opcji metalowego sprzęgła podatnego skrętnie, różniących

się zestawem sprężyn. Na rysunku 3 przedstawiono przykład wyznaczonej charakterystyki statycznej sprzęgła nr 1. Uzyskane charakterystyki statyczne metalowego sprzęgła podatnego skrotnie są charakterystykami liniowymi z tłumieniem.



Rys. 3. Graficzna ilustracja charakterystyki statycznej metalowego sprzęgła podatnego skrotnie nr 1  
Fig. 3. The illustration of some static characteristics of torsionally flexible metal coupling No. 1

Przy liniowych charakterystykach sprzęgła można określić sztywność skrętną sprzęgła  $k$  z zależności:

$$k = \frac{M_{stat}}{\varphi_{stat}} \quad (2)$$

gdzie:

$M_{stat}$  – statyczny moment obciążający sprzęgło, Nm,

$\varphi_{stat}$  – odpowiadający mu względny kąt skręcenia członów sprzęgła, radiany lub stopnie.

Istotną cechą charakteryzującą metalowe sprzęgło podatne jest także pochłanianie energii. Podczas obciążania i odciążania sprzęgła wyznaczono pętlę histerezy, która przedstawia straty energii mechanicznej w sprzęgle, zwane tłumieniem. W metalowym sprzęgle podatnym tłumienie spowodowane jest występowaniem tarcia konstrukcyjnego głównie w mechanizmie gwintowym i połączeniu wielowypustowym.

Tłumienie energii mechanicznej w sprzęgle charakteryzuje współczynnik tłumienia  $\psi$ , określany wg zależności:

$$\psi = \frac{A_r}{A_s} \quad (3)$$

gdzie:

$A_r$  – praca tłumienia podczas jednego cyklu pracy, Nm · stopnie,

$A_s$  – praca odkształcenia sprężystego na jeden cykl pracy, Nm · stopnie.

Uzyskane współczynniki sztywności skrętniej  $k$  oraz współczynniki tłumienia  $\psi$  dla badanych opcji metalowego sprzęgła podatnego przedstawiono w tablicy 2.

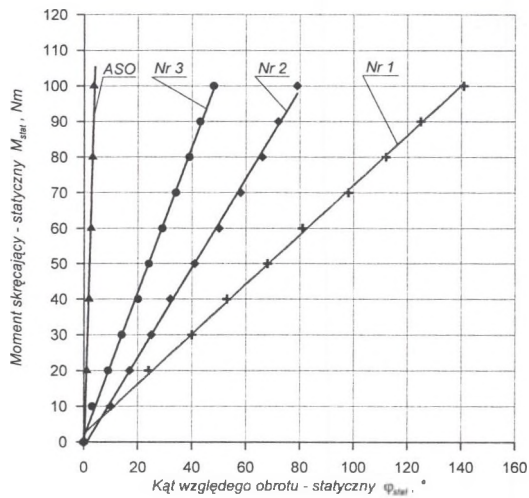
Celem porównania metalowego sprzęgła podatnego z typowym sprzęgłem podatnym oponowym typu 060 ASO 165 [8, 9] na rysunku 4 przedstawiono ich charakterystyki statyczne, bez uwzględniania pętli histerezy.

Tablica 2

Wartości współczynników sztywności skrętniej  $k_{stat}$   
oraz współczynników tłumienia  $\psi_{stat}$

Oznaczenie sprzęgła	Współczynnik sztywności skrętniej $k_{stat}$ , Nm/°	Współczynnik tłumienia $\psi_{stat}$
Nr 1	0,71	0,35
Nr 2	1,27	
Nr 3	2,08	

Klasyczne sprzęgła podatne z wkładkami elastomerowymi lub gumowymi pozwalają na uzyskiwanie kątów wzajemnego skręcenia tylko do kilku stopni [8, 9].

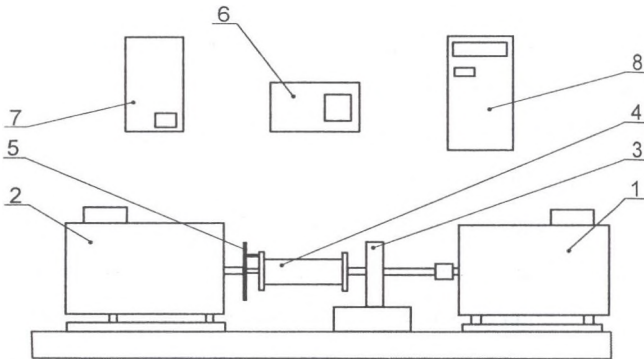


Rys. 4. Graficzna ilustracja charakterystyk statycznych metalowego sprzęgła podatnego skrętnie (nr: 1, 2, 3) oraz sprzęgła oponowego ASO [9]

Fig. 4. The static characteristics of prototype of the metal flexible torsional coupling (No.1, No.2 and No.3) and the tire flexible coupling (060 ASO 165) [9]

#### 4. Wyznaczanie charakterystyki dynamicznej sprzęgła

Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych sprzęgła przeprowadzono na stanowisku badawczym w Katedrze Logistyki i Transportu Przemysłowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w Katowicach (rys. 5). Opis jego budowy oraz zasady działania zawierają prace [2, 3, 8, 9].



Rys. 5. Schemat stanowiska do wyznaczania charakterystyki dynamicznej sprzęgła  
Fig. 5. Scheme and view of the research stand for research on the dynamic characteristics

Podstawowymi elementami stanowiska badawczego (rys. 5) są: trójfazowy silnik indukcyjny pierścieniowy M1 (1), trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy M2 (2), momentomierz (3), falownik działający jako przetwornica częstotliwości (7), sterownik mikroprocesorowy (8), układ pomiarowy względnego kąta obrotu członów sprzęgła (5). Badane sprzęgło (4) wraz z momentomierzem (3) umieszczone jest między silnikami M1 (1) i M2 (2).

Do pomiaru kąta wzajemnego skręcenia członów sprzęgła wykorzystywany jest układ tarczy z podziałką kątową (5), przymocowaną do jednego członu sprzęgła, względem której przesuwa się wskazówka umocowana do drugiego członu sprzęgła. Odczytu wirującego układu tarcza – wskazówka dokonuje się przy użyciu lampy stroboskopowej (6). Lampa stroboskopowa umożliwia pozorne zatrzymanie obrazu i bezpośredni odczyt kąta.

Charakterystyka dynamiczna wyraża zależność między amplitudą momentu obrotowego  $M_{dyn}$  obciążającego sprzęgło a kątem wzajemnego obrotu członów sprzęgła  $\varphi_{dyn}$ , przy założeniu że podczas wirowania całego układu napędowego wraz ze sprzęgłem w sposób okresowo zmienny zadawane są kolejne wartości momentu obrotowego  $M_{dyn}$ , przy jednoczesnym odczycie odpowiadających im wartości kąta  $\varphi_{dyn}$  [1, 3, 7, 9, 10].

Ze względu na specyficzną konstrukcję sprzęgła przyjęto częstotliwość zmian obciążenia sprzęgła równą 0,2 Hz i 0,5 Hz.

$$M_{dyn} = f(\varphi_{dyn}) \quad (4)$$

gdzie:

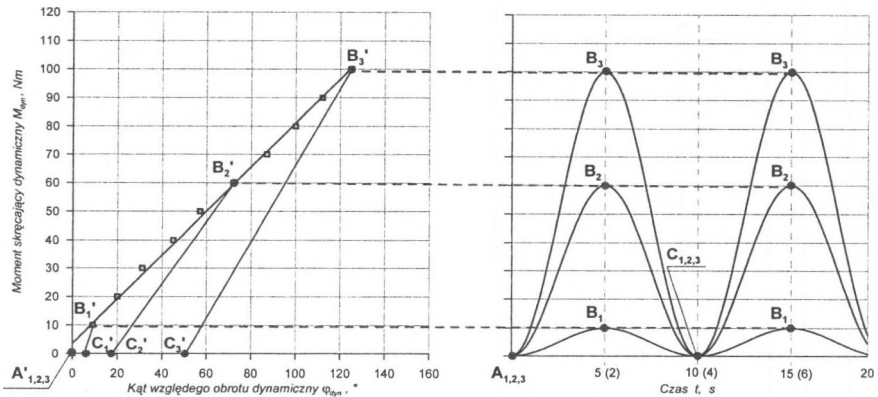
$M_{dyn}$  – dynamiczny moment skręcający obciążający sprzęgło, Nm,

$\varphi_{dyn}$  – dynamiczny względny kąt obrotu członów sprzęgła, radiany lub stopnie.

Podczas badania sprzęgło wiruje ze stałą prędkością obrotową  $n_{obr} = 1470 \text{ min}^{-1}$ . Moment obrotowy  $M_{dyn}$ , obciążający układ napędowy, zmieniany jest okresowo: w pierwszym wariancie co 5 s, a w drugim co 2 s, od wartości  $M_{dynmin} = 0 \text{ Nm}$  do chwilowej wartości maksymalnej amplitudy momentu  $M_{dynmax}$ . Wartość chwilowa amplitudy momentu zmieniana jest z krokiem 10 Nm do wartości 100 Nm.

Odczyt zmieniającego się okresowo momentu obrotowego oraz odczyt i rejestracja odpowiadającego mu względnego obrotu członów sprzęgła  $\varphi_{dyn}$  wykonywana za pomocą momentomierza i wskazówki na tarczy, przy zastosowaniu lampy stroboskopowej. Celem zapewnienia poprawnego odczytu kąta obraz rejestrowany jest za pomocą kamery cyfrowej.

Okresowo zmienny moment obrotowy  $M_{dyn} = f(t)$  umożliwia uzyskanie charakterystyki dynamicznej sprzęgła podatnego wraz z pętlą histerezy. Sposób wyznaczania charakterystyki przedstawiono na rysunku 6.



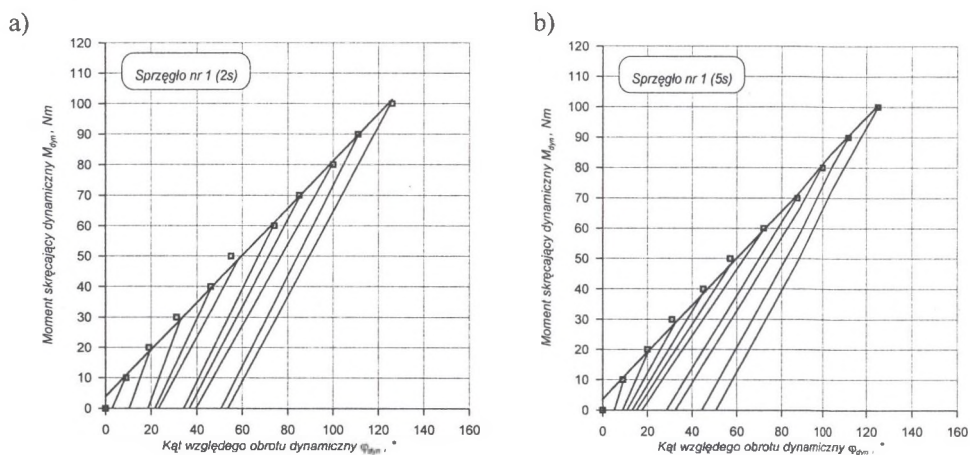
Rys. 6. Metoda wyznaczania charakterystyki dynamicznej metalowego sprzęgła podatnego skrętnie  
Fig. 6. Method of appointing the dynamic characteristics of the metal flexible torsional coupling

Kojarząc chwilowe wartości amplitudy momentu obrotowego  $M_{dyn}$  z odpowiadającymi im wartościami kątów względnego obrotu członów sprzęgła  $\varphi_{dyn}$  otrzymujemy charakterystykę sprzęgła podczas narastania momentu obrotowego  $A'_1 - B'_1$ ,  $A'_2 - B'_2$ ,  $A'_3 - B'_3$  od wartości  $M_{dynmin} = 0 \text{ Nm}$  do chwilowej wartości amplitudy momentu obrotowego  $M_{dynmax}$ . Podczas kojarzenia punktów chwilowych wartości amplitudy momentu obrotowego od punktów  $B_1, B_2, B_3$  do  $C_1, C_2, C_3$  z odpowiadającymi im wartościami kątów  $\varphi_{dyn}$  otrzymujemy charakterystykę podczas opadania momentu obrotowego  $B'_1 - C'_1$ ,  $B'_2 - C'_2$ ,



$B'_3 - C'_3$  od wartości  $M_{dynmax}$  do wartości  $M_{dynmin} = 0$  Nm. Każde kolejne narastanie i opadanie momentu obrotowego od punktów  $C_1, C_2, C_3$  do  $B_1, B_2, B_3$  itd. charakteryzuje pracę sprzęgła wzdłuż prostych  $C'_1 - B'_1, C'_2 - B'_2$  oraz  $C'_3 - B'_3$ .

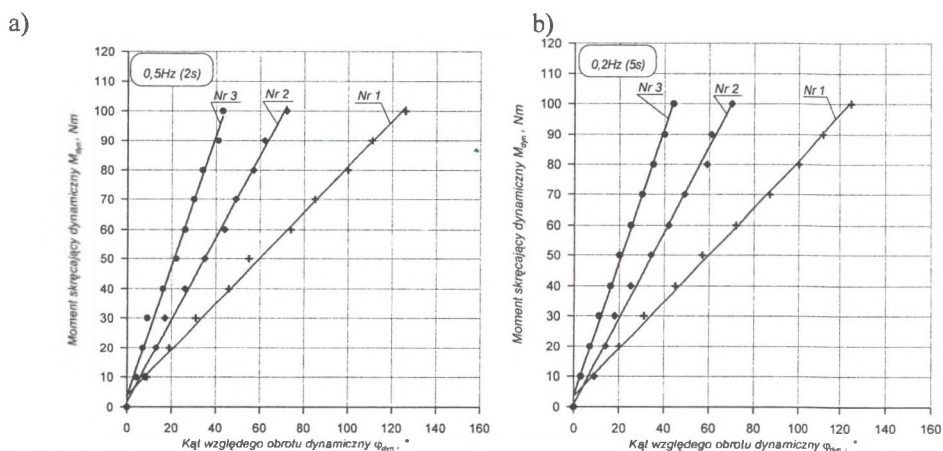
Na rysunku 7 przedstawiono przykład uzyskanej charakterystyki dynamicznej opcji prototypu metalowego sprzęgła podatnego skrętnie nr 1.



Rys. 7. Charakterystyki dynamiczne metalowego sprzęgła podatnego skrętnie nr 1, gdzie: a – częstotliwość 0,5 Hz (2 s), b – częstotliwość 0,2 Hz (5 s)

Fig. 7. Dynamic characteristics of the metal flexible torsional coupling No. 1, where: a – frequency 0.5 Hz (2 sec.), b – frequency 0.2 Hz (5 sec.)

Celem porównania charakterystyk dynamicznych sprzęgła, na rysunku 8, przedstawiono je bez uwzględniania pętli histerezy.



Rys. 8. Charakterystyki dynamiczne trzech opcji metalowego sprzęgła podatnego skrętnie, gdzie: a – częstotliwość 0,5 Hz (2 s), b – częstotliwość 0,2 Hz (5 s)

Fig. 8. Dynamic characteristics of three options of the metal flexible torsional coupling, where: a – frequency 0.5 Hz (2 sec.), b – frequency 0.2 Hz (5 sec.)

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania dotyczące wyznaczania sprężystych charakterystyk statycznych i dynamicznych metalowego sprzęgła podatnego skrętnie do zastosowania w maszynach górniczych pozwalają na wysunięcie kilku ogólnych wniosków, a mianowicie:

- Zaproponowane stanowisko badawcze, jak i przyjęta metodyka badań sprężystych charakterystyk statycznych i dynamicznych pozwalają na proste i poprawne ich wyznaczanie z akceptowalną dokładnością (w przypadku omawianej postaci konstrukcyjnej sprzęgła) i powtarzalnością uzyskiwanych wyników pomiarów.
- Uzyskane charakterystyki statyczne metalowego sprzęgła podatnego skrętnie są charakterystykami liniowymi z tłumieniem.
- Z przedstawionego porównania charakterystyki statycznej i dynamicznej wynika, że ich przebiegi, definiujące sztywność sprzęgła  $k$ , zależą od rodzaju pakietów sprężyn talerzowych umieszczonych w sprzęgle, a konkretnie od sztywności  $c_{zest}$  pakietu sprężyn.
- Tłumienie, wyrażone współczynnikiem tłumienia  $\psi$ , zależy od wartości sprzężenia ciernego występującego w mechanizmie śrubowym sprzęgła oraz od wartości sprzężenia ciernego w połączeniu wielowypustowym.
- Metalowe sprzęgło podatne skrętnie pozwala na uzyskiwanie bardzo dużych kątów względnego obrotu członów, nawet do kilkuset stopni; uzyskiwane kąty zdeterminowane są przez zastosowane zestawy sprężyn talerzowych.
- Porównanie charakterystyk dynamicznych przy badanych częstotliwościach zmian momentu obrotowego: 0,2 Hz i 0,5 Hz wskazuje, że zarejestrowane różnice między charakterystykami są niewielkie. Można wysunąć wniosek, że podobnie jak przy charakterystykach statycznych, charakterystyki te zależą przede wszystkim od cech konstrukcyjnych sprzęgła, tzn. rodzaju zastosowanego pakietu sprężyn oraz parametrów konstrukcyjnych mechanizmu śrubowego i połączenia wielowypustowego, a nie od częstotliwości wymuszeń.

Powyższe wnioski pozwalają na kształtowanie charakterystyk sprężystych sprzęgła, optymalnie dobranych do rodzaju napędzanej maszyny górniczej, bezpośrednio przez dobór odpowiedniego zestawu sprężyn o zadanej charakterystyce i sztywności, którą można prosto zdefiniować w sposób analityczny na etapie projektowania sprzęgła.

Przedstawione charakterystyki wskazują na niewątpliwe zalety przedstawionego rozwiązania konstrukcyjnego sprzęgła podatnego. Żadne z dotychczas stosowanych

w napędach maszyn górniczych sprzęgieł mechanicznych, nie posiada takich cech konstrukcyjnych umożliwiających uzyskanie charakterystyk sprężystych o przedstawionym powyżej przebiegu.

## BIBLIOGRAFIA

1. Dietrich M. (red.), Markusik S.: Podstawy konstrukcji maszyn. Tom III, wyd. 3. WNT, Warszawa 1999.
2. Filipowicz K., Kowal A.: Investigative stands to marking of characterizations of the metal susceptible clutch. *Transport Problems – International Scientific Journal*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, T.2, Zeszyt 4, Gliwice 2007, s.17-25.
3. Kowal A., Filipowicz K.: Metalowe sprzęgła podatne skrętnie do maszyn górniczych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
4. Kowal A., Filipowicz K.: Metalowe sprzęgła podatne skrętnie. *Górnictwo i Geologia*. T.1, Z. 2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
5. Kowal A., Filipowicz K.: The construction of metal flexible torsional coupling. *Transport Problems – International Scientific Journal*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, T. 2, Zeszyt 3, Gliwice 2007, s.73-80.
6. Kowal A.: Sprzęgło mechaniczne. Patent RP: PL 190945 B1 i PL-191092 B1 z lutego 2006.
7. Markusik S.: Sprzęgła mechaniczne. WNT, Warszawa 1979.
8. Opasiak T.: Badania charakterystyk statycznych i dynamicznych sprzęgieł nierozłącznych podatnych oponowych. Praca doktorska, Katowice 2004.
9. Opasiak T.: Metody wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych sprzęgieł podatnych. *Maszyny Dźwigowo-Transportowe*. Nr 2/2000, s.5-15.
10. Osiński Z.: Sprzęgła i hamulce. PWN, Warszawa 1985.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Senatorski